

## 自転車運動時のペダル回転数が呼吸・循環応答に及ぼす影響

塩 尻 智 之

横浜市立大学 運動・スポーツ科学教室

### 緒 言

自転車運動時のペダル回転数に関する研究は、ペダリング運動の効率を上昇させる至適回転数の観点から様々に検討されている<sup>6), 10), 16), 21)</sup>。酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) および心拍数 (HR) とペダル回転数とは非線形の関係にあり、至適回転数を中心にその前後で  $\dot{V}O_2$  や HR は増加する<sup>5), 6), 21)</sup>。これらの要因については、筋線維タイプの動員様式<sup>3)</sup>や筋ポンプ作用による筋および中心循環の血流状態<sup>9)</sup>などが関与する。相対的に高いペダル回転数では、心拍出量の増加や総血管抵抗の低下が起きる<sup>9)</sup>ことから、ペダル回転数の上昇に伴って筋への酸素供給が増し、 $\dot{V}O_2$  の応答が促進されると予想される。

人の骨格筋は遅筋線維 (type I) と速筋線維 (type II) の2つの主要な筋線維タイプによって構成されるが、自転車運動時になされる外的仕事率が一定であれば、相対的に低い回転数では高い筋出力が要求され、また、相対的に高い回転数では速い筋収縮速度が要求されるため、type II の運動単位がより多く動員される<sup>1), 20)</sup>。type II の筋線維は、type I に比べて酸素1モル当たりの高エネルギーリン酸の産生量 (~P/O比率) が低く<sup>13)</sup>、type II 線維の動員様式が  $\dot{V}O_2$  の応答性に影響を与えることが予想される。

そこで本研究では、自転車運動時のペダル回転数が運動開始時の  $\dot{V}O_2$  応答に及ぼす影響について検討することにした。さらに、 $\dot{V}O_2$  応答には、酸素を運搬する循環系の応答性が深く関与するため、これらの応答性に及ぼす影響についてもあわせて検討することにした。

### 方 法

定期的に身体活動を行っていない健康な男性4名を被験者として用いた。全ての被験者には、実験の内容について説明し、参加の同意を得た。被験者の平均 ( $\pm$ SD) 年齢、身長、体重および最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2\max}$ ) はそれぞれ  $29.0 \pm 10.0$  歳、 $171.0 \pm 4.2$  cm、 $71.3 \pm 7.0$  kg、 $41.8 \pm 8.4$  ml  $\cdot$  kg<sup>-1</sup>  $\cdot$  min<sup>-1</sup> であった。

各被験者はテスト運動での負荷強度を決定するための漸増負荷運動とペダル回転数の異なる3種類の一定負荷運動を行うために、4回実験室に訪れた。漸増負荷テストと一定負荷運動テストの間隔は2日以上あけ、全てのテストを2週間以内に実施した。被験者には、それぞれのテストの前日から過度の運動を避けるように指示し、3時間前から、食べ物、アルコールおよびカフェインの摂取を禁止した。なお、全ての実験は、室温22~25℃、相対湿度50~60%の実験室内において実施した。

テスト初日に被験者は、コンビ社製の自転車エルゴメータ (Model 50) を用いた漸増負荷テストを行うため、測定開始の30分前に来室し、椅座位安静を保った。その後、エルゴメータ上で2分間の安静を保った後、無負荷での自転車運動を2分間行い、負荷強度が1分ごとに30Wずつ上昇する漸増運動を疲労困憊に至るまで継続した。被験者にはペダルの回転数をメトロノームの音にあわせて50~60rpmで維持するように指示し、 $\dot{V}O_2$  のレベルオフがみられるか、40rpm以下の回転数が10秒以上継続した時点で運動を終了させた。

安静時および漸増負荷運動時のガス交換動態の測定には、エアロモニター (ミナト医科学社製、

AE-280) を用い、一呼吸毎に一回換気量 ( $V_T$ ), 分時換気量 ( $\dot{V}_E$ ), 呼吸数 ( $f$ ),  $\dot{V}O_2$ , 二酸化炭素排出量 ( $\dot{V}CO_2$ ), 呼吸交換率 ( $R$ ), 呼気終末酸素分圧 ( $PETO_2$ ), 呼気終末二酸化炭素分圧 ( $PETCO_2$ ), 酸素換気当量 ( $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ ) および二酸化炭素換気当量 ( $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ ) を算出した。これらのデータは連続的に計測用コンピュータ (NEC 社製, PC-9801RA) に転送し、フロッピーディスクに保存した。測定終了後、これらのデータから  $\dot{V}O_{2max}$  と乳酸性作業閾値 (LT) を算出した。 $\dot{V}O_{2max}$  は、負荷の増加に対して  $\dot{V}O_2$  のレベルオフがみられない場合、運動終了時の最大値とした。LT は、①  $\dot{V}_E$  および  $\dot{V}CO_2$  が非直線的に増加する点、②  $PETCO_2$  の減少を伴わずに  $PETO_2$  が増加する点、③  $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$  の増加を伴わずに  $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$  が増加する点、④  $R$  の増加が急峻となる点、および⑤ V-slope法を用いて総合的に判定した<sup>4), 24)</sup>。

テスト 2 日目以降に被験者は、LT の 80% に相当する負荷強度の自転車運動を 40, 60, 80 rpm の 3 種類のペダル回転数で実施した。これらの順序は被験者ごとにランダムになるように配慮した。被験者は自転車エルゴメータ (コンビ社製, Model 50) 上で 2 分間の安静を保ち、3 分間の運動を 15~20 分間の安静をはさんで 4 回繰り返して実施した<sup>14)</sup>。安静時のガス交換データを測定した後、被験者は呼気の終了と同時に運動を開始した。運動開始時点でのエルゴメータのフライホイールの慣性による抵抗を取り除くために、運動開始前から実験補助者がフライホイールを回転させ、運動開始に同期して被験者はペダリングを開始した。

安静時および一定負荷運動時のガス交換動態の測定には、漸増負荷テストと同様な方法を用いた。また、循環動態の測定には、フィナプレス血圧モニター (オメガ社製, 2300 Finapress) を用いた。この測定器では指先の血圧を測定するため、カフを右手中指の中節骨部分に巻き付けた。末梢の血圧は血液の静水圧の影響を受けるため、右手は常に心臓位になるように支持台上に固定した。被験者には運動中右手に力を込めないように指示し、エルゴメータのハンドルは左手のみで握らせた。

血圧のアナログ信号と胸部双極誘導により導出し、生体電気アンプ (日本光電工業社製, AB-621G) によって増幅した信号は、12 ビット A/D コンバータ (カノーブス電子社製, Analog Pro II) を介して 500 Hz のサンプリングレートでパーソナルコンピュータ (NEC 社製, PC-9801RA) に取り込み、光磁気ディスクに保存した。これらのデータから、収縮期血圧 (SBP), 拡張期血圧 (DBP), 平均血圧 (MAP), 心拍数 (HR), 一回拍出量 (SV) を一拍動毎に算出した。MAP は血圧波形から 1 心周期を積分して直接求めた。フィナプレス血圧モニターを用いて算出した血圧は、観血的に求めた中心動脈血圧とよく一致することが示されている<sup>11), 17)</sup>。SV の算出には、血圧波形から Wesseling ら<sup>26)</sup> の Pulse contour 法およびその修正法<sup>22)</sup> を利用し、次の式より求めた。

$$SV = (PSA/Zao_{ini}) \times [1320 + HR \times 10 - age \times (0.28 \times MAP - 16)] / 2000$$

この式の PSA は血圧波形の拍出期間を積分した値 ( $mmHg \cdot s^{-1}$ ) であり、 $Zao_{ini}$  は大動脈のインピーダンスで、 $(90 + age) / 1000$  として算出される。

このようにして算出した SV と HR から、心拍出量 ( $\dot{Q}_c$ ) を  $SV \times HR$  として求めた。また、総末梢血管コンダクタンス (TPC) を  $\dot{Q}_c / MAP$  より、動静脈酸素較差 ( $av \Delta O_2$ ) を  $\dot{V}O_2 / \dot{Q}_c$  より算出した。なお、Pulse contour 法を用いて算出した  $\dot{Q}_c$  は、他の観血的な方法を用いて算出した  $\dot{Q}_c$  と高い相関があることが示されている<sup>2), 12), 22)</sup>。

一呼吸毎および一拍動毎に得られたデータは 1 秒毎のデータに補間し、同じペダル回転数条件の 4 回の応答間、同一被験者内で加算平均して平均応答を求めた。この平均応答データより  $\dot{V}O_2$  の応答性を数値化するために、非線形最小二乗法を用いて次の式に当てはめた<sup>27)</sup>。

$$F(t) = BL + G_0 \cdot [1 - e^{-t/\tau_0}] \cdot u_0 + G_1 \cdot [1 - e^{-(t-TD_1)/\tau_1}] \cdot u_1 \quad (Eq. 1)$$

この式の BL は安静時の値、 $G_0$  と  $G_1$  はそれぞれ第 1 相、第 2 相の増加量 (gain),  $TD_1$  は遅れ時間、 $\tau_0$  と  $\tau_1$  は時定数である。 $u_0$  および  $u_1$  は 0 か 1 の値をもつ変数で、 $t < 0$  で  $u_0 = 0$ ,  $t \geq 0$  で  $u_0 = 1$ ,  $t < TD_1$  で  $u_1 = 0$ ,  $t \geq TD_1$  で  $u_1 = 1$  となる。

$\dot{Q}_c$ , TPCについても同様に、次の式に当てはめて応答性を数値化した。

$$F(t) = BL + G \cdot [1 - e^{-t/\tau}] \cdot u \quad (\text{Eq. 2})$$

この式のBLは安静時の値、Gは安静から定常状態までの増加量、 $\tau$ は時定数である。uについては、 $t < 0$ で $u = 0$ 、 $t \geq 0$ で $u = 1$ となる変数である。

$\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}_c$ およびTPCの応答性を比較するために、 $\dot{V}O_2$ については平均応答時間(MRT)を $G_0/(G_0 + G_1) \times \tau_0 + G_1/(G_0 + G_1) \times (TD_1 + \tau_1)$ より算出し、 $\dot{Q}_c$ およびTPCについては $\tau$ の値をそのままMRTとした。

40, 60, 80 rpmの3条件における各項目の差の検定には、繰り返しのある1元配置の分散分析を用いた。また、3条件に伴う $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{Q}_c$ およびTPCのMRTの差の検定には、繰り返しのある2元配置の分散分析を用いた。なお、有意水準は5%とした。

## 結 果

本研究に用いた被験者の平均(±SD)のLTは、 $17.3 \pm 1.6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であり、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の $42.1 \pm 4.2\%$ に相当した。また、一定負荷運動テストに用いた負荷強度は、 $72.5 \pm 5.5 \text{ W}$ であった。

表1は、安静時および運動終了時のガス交換値を示したものである。運動終了時の $\dot{V}_E$ において、

3条件間に有意な差がみられ( $F(2, 6) = 6.53$ ,  $P < 0.05$ )、ペダル回転数の増加に伴って高い値を示した( $P < 0.01$ )。また、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ においても同様に、3条件間に有意な差がみられ( $\dot{V}O_2$ ,  $F(2, 6) = 7.94$ ,  $P < 0.05$ ;  $\dot{V}CO_2$ ,  $F(2, 6) = 15.59$ ,  $P < 0.01$ )、40 rpmでもっとも低く、60 rpm, 80 rpmになるに従って高い値を示した( $P < 0.01$ )。R,  $av \Delta O_2$ においては、条件間に有意な差はみられなかった。

表2は、安静時および運動終了時の循環系の値を示したものである。運動終了時のHRにおいて、3条件間に有意な差がみられ( $F(2, 6) = 5.67$ ,  $P < 0.05$ )、ペダル回転数の増加に伴って高い値を示した( $P < 0.01$ )。SV,  $\dot{Q}_c$ , MAPおよびTPCにおいては、条件間に有意な差はみられなかった。

図1と図2は、それぞれ一定負荷運動テスト中の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{Q}_c$ および $av \Delta O_2$ の経時変化とHR, SVおよびTPCの経時変化を示したものである。また、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{Q}_c$ およびTPCの応答パラメータを表3に示した。 $\dot{V}O_2$ についてみると、運動による増加量( $G_0 + G_1$ )において3条件間に有意な差がみられ( $F(2, 6) = 7.08$ ,  $P < 0.05$ )、ペダル回転数の増加に伴って高い値を示した( $P < 0.01$ )。しかしながら、第1相および第2相の時定数( $\tau_0$ ,  $\tau_1$ )および遅れ時間( $TD_1$ )については、条件

Table 1. Mean values for respiratory variables at rest (Rest) and at the end of exercise (EndEX) as functions of pedal frequency

|  | rpm                  |                  |                  |
|--|----------------------|------------------|------------------|
|  | 40                   | 60               | 80               |
| $\dot{V}_E, \text{l} \cdot \text{min}^{-1}$        |                      |                  |                  |
| Rest   | $8.9 \pm 1.1$        | $8.4 \pm 1.5$    | $9.8 \pm 1.4$    |
| EndEX  | $26.6 \pm 1.5^{a,b}$ | $30.3 \pm 2.5^b$ | $36.8 \pm 5.3$   |
| $\dot{V}O_2, \text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$      |                      |                  |                  |
| Rest   | $295 \pm 20^d$       | $288 \pm 13^d$   | $328 \pm 17$     |
| EndEX  | $1046 \pm 108^{a,b}$ | $1177 \pm 67^b$  | $1329 \pm 126$   |
| $\dot{V}CO_2, \text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$     |                      |                  |                  |
| Rest   | $237 \pm 15^d$       | $221 \pm 7^b$    | $269 \pm 8$      |
| EndEX  | $910 \pm 70^{a,b}$   | $1048 \pm 79^b$  | $1255 \pm 122$   |
| R  |                      |                  |                  |
| Rest   | $0.81 \pm 0.02$      | $0.77 \pm 0.03$  | $0.82 \pm 0.05$  |
| EndEX  | $0.91 \pm 0.02$      | $0.90 \pm 0.02$  | $0.94 \pm 0.02$  |
| $av \Delta O_2, \text{ml O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ |                      |                  |                  |
| Rest   | $83.3 \pm 9.26$      | $91.1 \pm 26.3$  | $92.0 \pm 17.6$  |
| EndEX  | $132.7 \pm 5.76$     | $161.5 \pm 42.9$ | $164.8 \pm 45.8$ |

Values are means ± SD for four subjects. rpm, Revolutions/min;  $\dot{V}_E$ , pulmonary ventilation;  $\dot{V}O_2$ , oxygen uptake;  $\dot{V}CO_2$ , carbon dioxide output; R, respiratory exchange ratio;  $av \Delta O_2$ , arteriovenous  $O_2$  content difference. <sup>a</sup>  $P < 0.01$ , compared with 60 rpm; <sup>b</sup>  $P < 0.01$ , compared with 80 rpm; <sup>c</sup>  $P < 0.05$ , compared with 60 rpm; <sup>d</sup>  $P < 0.05$ , compared with 80 rpm.

Table 2. Mean values for cardiovascular variables at rest (Rest) and at the end of exercise (EndEX) as functions of pedal frequency

|  | rpm                  |                     |                     |
|--|----------------------|---------------------|---------------------|
|  | 40                   | 60                  | 80                  |
| HR, beats $\cdot \text{min}^{-1}$                            |                      |                     |                     |
| Rest   | $68.1 \pm 6.3$       | $73.2 \pm 2.3$      | $73.2 \pm 6.3$      |
| EndEX  | $96.3 \pm 7.9^{a,b}$ | $106.7 \pm 4.7^b$   | $109.9 \pm 8.7$     |
| SV, ml   |                      |                     |                     |
| Rest   | $46 \pm 3$           | $40 \pm 14$         | $44 \pm 3$          |
| EndEX  | $70 \pm 5$           | $61 \pm 17$         | $63 \pm 9$          |
| $\dot{Q}_c, \text{l} \cdot \text{min}^{-1}$                  |                      |                     |                     |
| Rest   | $3.6 \pm 0.4$        | $3.4 \pm 1.0$       | $3.7 \pm 0.6$       |
| EndEX  | $7.9 \pm 0.9$        | $7.7 \pm 2.0$       | $8.4 \pm 1.6$       |
| MAP, mmHg  |                      |                     |                     |
| Rest   | $91.3 \pm 2.2$       | $103.9 \pm 14.4$    | $91.9 \pm 7.4$      |
| EndEX  | $97.1 \pm 11.1$      | $99.7 \pm 12.4$     | $93.5 \pm 5.4$      |
| TPC, $\text{l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mmHg}^{-1}$ |                      |                     |                     |
| Rest   | $0.0380 \pm 0.0035$  | $0.0341 \pm 0.0163$ | $0.0397 \pm 0.0077$ |
| EndEX  | $0.0813 \pm 0.0083$  | $0.0723 \pm 0.0270$ | $0.0888 \pm 0.0218$ |

Values are means ± SD for four subjects. rpm, Revolutions/min; HR, heart rate; SV, stroke volume;  $\dot{Q}_c$ , cardiac output; MAP, mean arterial pressure; TPC, total peripheral conductance. <sup>a</sup>  $P < 0.01$ , compared with 60 rpm; <sup>b</sup>  $P < 0.01$ , compared with 80 rpm.

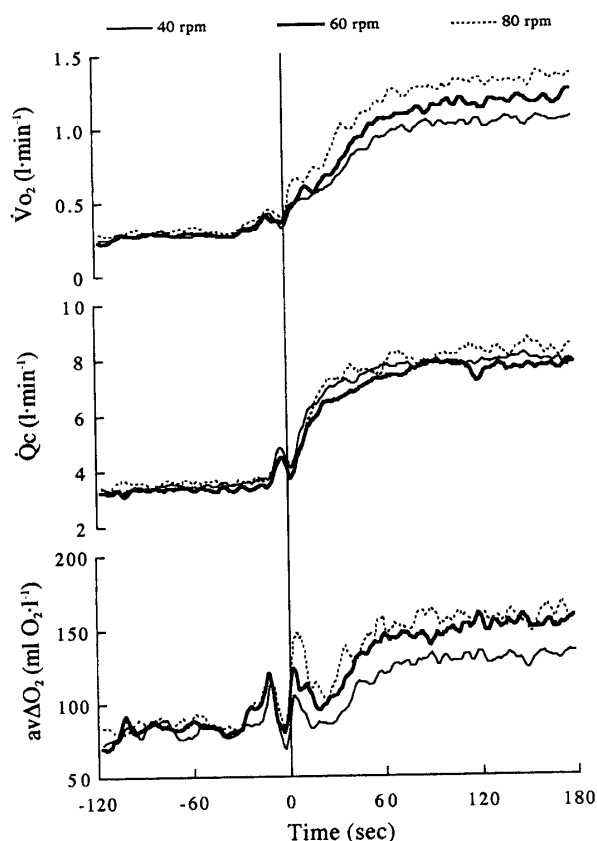


Fig. 1. Group mean responses of oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ; top), cardiac output ( $\dot{Q}_c$ ; middle), and arteriovenous  $O_2$  content difference ( $av\Delta O_2$ ; bottom) for transition from rest to exercise at pedaling frequencies of 40 (solid line), 60 (bold line), 80 (dashed line) rpm ( $n=4$ ). Vertical line at time 0 represents the start of exercise.

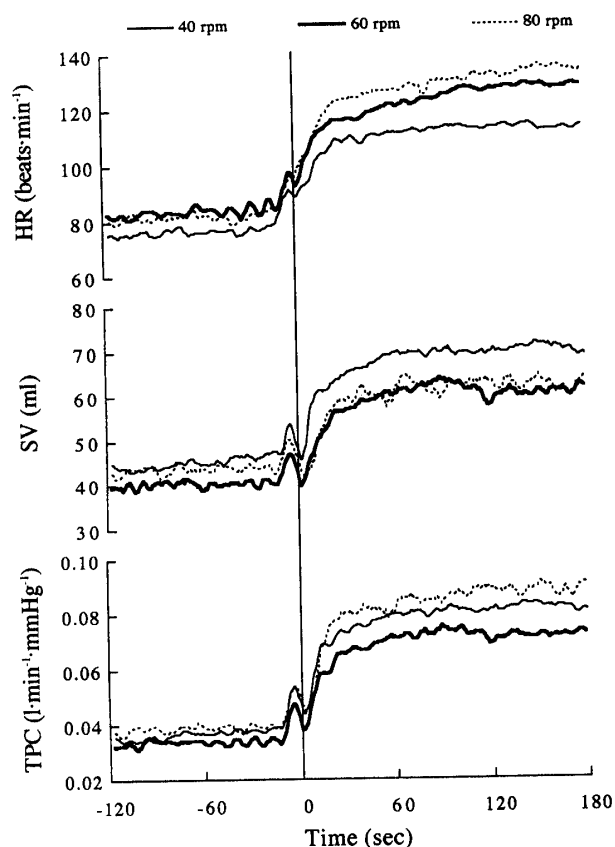


Fig. 2. Group mean responses of heart rate (HR; top), stroke volume (SV; middle), total peripheral conductance (TPC; bottom) for transition from rest to exercise at pedaling frequencies of 40 (solid line), 60 (bold line), 80 (dashed line) rpm ( $n=4$ ). Vertical line at time 0 represents the start of exercise.

Table 3. Parameters of  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{Q}_c$  and TPC response as functions of pedal frequency

|  | rpm                      |                       |                 |
|--|--------------------------|-----------------------|-----------------|
|  | 40                       | 60                    | 80              |
| $\dot{V}O_2$ , ml·min <sup>-1</sup>          |                          |                       |                 |
| $G_0$  | 307 ± 81                 | 304 ± 92              | 351 ± 75        |
| $\tau_0$                                     | 7.9 ± 9.5                | 4.8 ± 2.7             | 1.9 ± 0.9       |
| $G_1$  | 445 ± 161                | 590 ± 68              | 653 ± 47        |
| $TD_1$                                       | 26.6 ± 5.0               | 24.6 ± 5.4            | 19.5 ± 3.9      |
| $\tau_1$                                     | 23.5 ± 6.5               | 27.7 ± 12.3           | 28.5 ± 7.7      |
| $G_0+G_1$                                    | 752 ± 102 <sup>a,b</sup> | 894 ± 58 <sup>b</sup> | 1004 ± 115      |
| $\dot{Q}_c$ , l·min <sup>-1</sup>            |                          |                       |                 |
| $G$  | 4.3 ± 0.6                | 4.3 ± 1.0             | 4.7 ± 1.0       |
| $\tau$                                       | 17.2 ± 2.6               | 23.7 ± 4.8            | 23.6 ± 15.2     |
| TPC, l·min <sup>-1</sup> ·mmHg <sup>-1</sup> |                          |                       |                 |
| $G$  | 0.0433 ± 0.0058          | 0.0382 ± 0.0110       | 0.0493 ± 0.0147 |
| $\tau$                                       | 14.2 ± 2.6               | 17.9 ± 8.5            | 20.2 ± 16.7     |

Values are means ± SD. rpm, Revolution/min;  $\dot{V}O_2$ , oxygen uptake;  $\dot{Q}_c$ , cardiac output; TPC, total peripheral conductance.  $G_0$ ,  $\tau_0$ ,  $G_1$ ,  $TD_1$  and  $\tau_1$  are from Eq. 1.  $G$  and  $\tau$  are from Eq. 2. <sup>a</sup>  $P<0.01$ , compared with 60 rpm; <sup>b</sup>  $P<0.01$ , compared with 80 rpm.

間に有意な差はみられなかった。 $\dot{Q}_c$ およびTPCについては、運動による増加量 ( $G$ ), 時定数 ( $\tau$ )ともに条件による有意な差はみられなかった。

図3は、 $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{Q}_c$ およびTPCのMRTを示したものである。分散分析の結果、ペダル回転数によ

る効果は有意ではなかったが、パラメータによる効果は有意であり ( $F(2, 6)=8.17$ ,  $P<0.05$ ),  $\dot{V}O_2$ のMRTは、 $\dot{Q}_c$ およびTPCのMRTよりも有意に大きな値を示した ( $\dot{V}O_2-\dot{Q}_c$ ,  $P<0.05$ ;  $\dot{V}O_2-TPC$ ,  $P<0.01$ )。図4にはこれらの関係を模式的に示した。

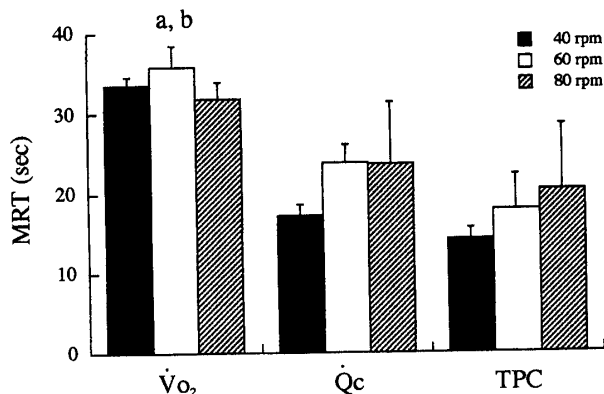


Fig. 3. Effect of varying pedal frequency on mean response time (MRT) for oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ), cardiac output ( $\dot{Q}_c$ ) and total peripheral conductance (TPC). Data are means ± SE;  $n=4$ . <sup>a</sup>  $P<0.05$ , compared with  $\dot{Q}_c$ ; <sup>b</sup>  $P<0.01$ , compared with TPC.

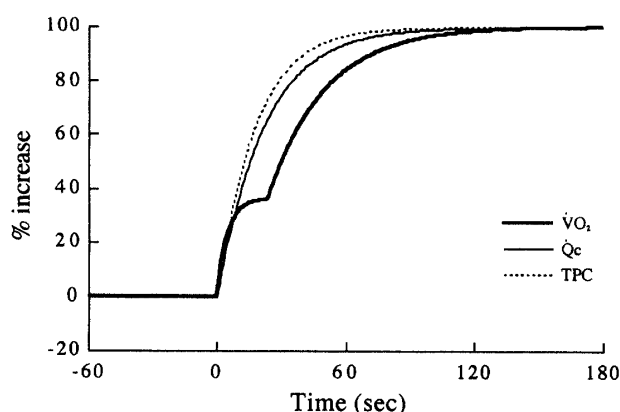


Fig. 4. Summary of observed relationship between kinetics.

## 考 察

本研究に用いた乳酸性作業閾値 (LT) 以下 (80% LT) の自転車運動においては、ペダル回転数の増加に伴って  $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$  および HR の増加がみられた。しかしながら、運動開始時の  $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{Q}_c$ 、TPC の応答性には、ペダル回転数の影響はみられなかった。

ペダル回転数の増加に伴って  $\dot{V}O_2$  が増加することから、酸素の利用効率あるいはエネルギー産生効率 (～P/O 比率) の低下が type II 線維の動員増によって引き起こされたと考えられる。ペダル回転数および運動強度と  $\dot{V}O_2$  との関係について検討した先行研究<sup>5), 6)</sup> においては、 $\dot{V}O_2$  とペダル回転数とは 2 次曲線の関係にあり、負荷強度の増加に伴って曲線の最下点、つまり効率の最も良い点 (至適回転数) が上昇することが示されている。また、Böning ら<sup>5)</sup> の結果から、定期的に運動を行っていない被験者の至適回転数は、50 W で 52.3 rpm、100 W では 60.7 rpm と計算される。本研究に用いた運動強度は 66～78 W であることから、80 rpm において最も大きな値になる点では一致しているが、40 rpm と 60 rpm との関係においては、多少の相違がみられた。type II 線維の動員は、相対的に筋出力が増加する低いペダル回転数でも起きる<sup>1)</sup> が、本研究に用いた 80% LT 強度の運動では 40 rpm と 60 rpm との間で大きな差はなく、ペダル回転数の増加に伴う筋収縮速度の増加が、type II 線維の動員の増加に強く関与し<sup>20)</sup>、結果的にペダル回転数の増加に伴って  $\dot{V}O_2$  が増

加したと考えられる。

$\dot{V}_E$  および  $\dot{V}CO_2$  においても  $\dot{V}O_2$  と同様に、ペダル回転数の増加に伴って高い値を示した。Takano<sup>23)</sup> はペダル回転数の増加に伴う  $\dot{V}_E$  の増加が、運動のテンポと呼吸リズムの同期に伴う呼吸数の増加によって引き起こされることを示している。しかしながら、本研究においては、運動時の呼吸数には条件間の差がないため、 $\dot{V}_E$  の増加が運動リズムとの同期によるとは考えにくい。運動時の換気亢進には、高次中枢神経系から呼吸中枢への換気ドライブの増加、中枢および末梢化学受容器からの入力、活動筋からの group III, IV 神経を介した神経性の反射<sup>15)</sup> などが関与する。ペダル回転数の増加に伴う筋の収縮・弛緩リズムの増加が group III 神経の終端に対する機械的刺激を増加させ、 $\dot{V}_E$  を増加させた可能性が考えられる。また、type II 線維の動員増に伴う乳酸産生の増加が相対的な乳酸性アシドーシスを引き起こし、血中の  $CO_2$  濃度の増加を介して中枢および末梢化学受容器を刺激して  $\dot{V}_E$  を増加させた可能性も考えられる。このことは、Cox ら<sup>7)</sup> がペダル回転数の増加に伴って、乳酸産生が増加することを示していることに加え、本研究においてもペダル回転数の増加に伴って  $\dot{V}CO_2$  が増加することからもその可能性が高いと考えられる。活動筋での乳酸産生の増加は、group II 神経の終端を化学的に刺激し、結果的に  $\dot{V}_E$  を増加させたと考えられる。

運動中の HR も同様に、ペダル回転数の増加に伴って高い値を示した。HR の増加には、 $\dot{V}_E$  の増加と同様に、筋の収縮・弛緩サイクルの上昇に伴う central command の変化<sup>19)</sup> や group III, IV 神経を介した活動筋からのフィードバック作用<sup>19)</sup> が強く関与していると考えられる。いずれにしろ、これらの変化に伴って、副交感神経の抑制と交感神経活動の亢進の相互作用が強まり、HR を増加させたと考えられる。

HR の増加に反して、運動中の  $\dot{Q}_c$  および SV はペダル回転数の増加による変化を示さなかった。Gotshall ら<sup>9)</sup> はペダル回転数の増加に伴って、 $\dot{Q}_c$  および SV が増加することを示している。しかしながら、彼らが用いたペダル回転数は、70, 90 お

および110 rpmと本研究よりも高く、運動強度も200 Wと高いため、筋ポンプ作用が強く現れたと考えられる。また、筋ポンプ作用は、筋の収縮・弛緩サイクルの上昇によって強められるが、筋出力の増加に伴う静脈の圧迫によっても強められる<sup>18)</sup>。このことから、相対的に低い回転数においても、一回ごとの筋収縮による筋出力は大きくなり、静脈環流量の増加に伴って $\dot{Q}_c$ が増加する可能性がある。Böningら<sup>5)</sup>の結果から、定期的に運動を行っていない被験者のHRにおける至適回転数は、50 Wで52.6 rpm、100 Wで57.6 rpmと計算されることから、60 rpmを中心に筋ポンプに対する筋収縮・弛緩サイクルによる作用と筋出力による作用が相殺し、ペダル回転数の変化に伴う $\dot{Q}_c$ およびSVの変化が大きく現れなかったと考えられる。

運動終了時の値に示された結果は、ペダル回転数の増加に伴うtype II線維の動員増を強く示すものであるが、このことは $\dot{V}O_2$ の応答性には強い影響を及ぼさなかった。Barstowら<sup>3)</sup>は、LT以上の運動負荷を用いてペダル回転数が $\dot{V}O_2$ の応答性に及ぼす影響について検討しているが、 $\dot{V}O_2$ の徐成分 (slow component) の増加はみられるものの、本研究と同様に、時定数についてはペダル回転数による差はみられていない。筋収縮に伴うカルシウムポンプ作用はATPを必要とするが、type II線維においては、この作用がtype Iに比べて5～10倍大きく<sup>8), 25)</sup>、また、type II線維のミトコンドリアは18%低い～P/O比率を示す<sup>28)</sup>ことから、ATPの再合成には $\dot{V}O_2$ の増加が必要になる。しかしながら、ペダル回転数の増加に伴うtype II線維の動員増は、筋血流が十分で筋への酸素の供給が満たされ、なおかつ、乳酸などの老廃物の洗い流しが十分であるならば、ATP再合成の律速要因 (rate-limiting factor) にはならないと考えられる。本研究に用いた運動強度が低く、type II線維の動員の絶対量が少ないことも一因であるが、 $\dot{Q}_c$ およびTPCの応答性にペダル回転数による影響がみられないことから、低い～P/O比率に見合う筋血流量が確保されていたと考えられる。このことは、図5に示したように $\dot{V}O_2$ の応

答よりも $\dot{Q}_c$ およびTPCの応答が速いこと、さらに、 $av \Delta O_2$ に差がないことから、筋への酸素の供給と利用のミスマッチが起きていないことが裏付けられる。

以上のことから、自転車運動時のペダル回転数の増加は、type II線維の動員割合を増加させるが、LT以下の運動強度では、酸素の供給と利用のバランスが保たれ、 $\dot{V}O_2$ の応答性に差を生じないことが示唆される。

## 要 約

健康な成人男性4名を被験者として、負荷強度が80%LTに相当する自転車運動時のペダル回転数(40, 60, 80 rpm)が運動開始時の呼吸・循環応答に及ぼす影響について検討した。

ペダル回転数の増加に伴って $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ およびHRの増加がみられるが、運動開始時の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{Q}_c$ およびTPCの応答性には、ペダル回転数の影響はみられなかった。

これらのことから、自転車運動時のペダル回転数の増加は、type II線維の動員割合を増加させるが、LT以下の運動強度では、酸素の供給と利用のバランスが保たれ、 $\dot{V}O_2$ の応答性に差を生じないことが示唆される。

## 参考文献

- 1) Ahlquist, L. E., D. R. Bassett Jr, R. Sufit, F. J. Nagle, and D. P. Thomas (1992) The effect of pedaling frequency on glycogen depletion rates in type I and type II quadriceps muscle fibers during submaximal cycling exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 65 : 360-364.
- 2) Antonutto, G., M. Girardis, D. Tuniz, and P. E. di Prampero (1995) Noninvasive assessment of cardiac output from arterial pressure profiles during exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 72 : 18-24.
- 3) Barstow, T. J., A. M. Jones, P. H. Nguyen, and R. Casaburi (1996) Influence of muscle fiber

- type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *J. Appl. Physiol.* 81: 1642-1650.
- 4) Beaver, W. L., K. Wasserman, and B. J. Whipp (1986) A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J. Appl. Physiol.* 60 : 2020-2027.
  - 5) Böning, D. Y. Gönen, and N. Maassen (1984) Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness. *Int. J. Sports Med.* 5 : 92-97.
  - 6) Coast J. R., and H. G. Welch (1985) Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol.* 53 : 339-342, 1985.
  - 7) Cox, M. H., D. S. Miles, T. J. Verde, and G. Nessesenthaler (1994) Influence of pedal frequency on the lactate threshold of elite cyclists. *Med. Sci. Sport Exerc.* 26 : S67.
  - 8) Gibbs, C. L., and W. R. Gibson (1972) Energy production of the rat soleus muscle. *Am. J. Physiol.* 223 : 864-871.
  - 9) Gotshall, R. W., T. A. Bauer, and S. L. Fahrner (1996) Cycling cadence alters exercise hemodynamics. *Int. J. Sports Med.* 17 : 17-21.
  - 10) Hagberg, J. M., J. P. Mullin, M. D. Giese, and E. Spitznagel (1981) Effect of pedaling rate on submaximal exercise responses of competitive cyclists. *J. Appl. Physiol.* 51 : 447-451.
  - 11) Imholz, B. P. M., J. J. Settels, A. H. van der Meiracker, K. H. Wesseling, and W. Wieling (1990) Non-invasive continuous finger blood pressure measurement during orthostatic stress compared to intra-arterial pressure. *Cardiovasc. Res.* 24 : 214-221.
  - 12) Jansen, J. R. C., K. H. Wesseling, J. J. Settels, and J. J. Schreuder (1990) Continuous cardiac output monitoring by pulse contour during cardiac surgery. *Eur. Heart J.* 11, Suppl. Öü : 26-32.
  - 13) Kushmerick, M. J., R. A. Meyer, and T. R. Brown (1992) Regulation of oxygen consumption in fast- and slow-twitch muscle. *Am. J. Physiol.* 263 (Cell Physiol. 32); C598-C606.
  - 14) Lamarra, N., B. J. Whipp, S. A. Ward, and K. Wasserman (1987) Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. *J. Appl. Physiol.* 62 : 2003-2012.
  - 15) McCloskey, D. I., and J. H. Mitchell (1972) Reflex cardiovascular and respiratory responses originating in exercising muscle. *J. Physiol. Lond.* 224 : 173-186.
  - 16) McKay, G. A., and E. W. Bannister (1976) A comparison of maximum oxygen uptake determination by bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speed. *Eur. J. Appl. Physiol.* 35 : 191-200.
  - 17) Parati, G., R. Casadei, A. Groppelli, M. Di Rienzo, and G. Mancia (1989) Comparison of finger and intra-arterial blood pressure monitoring at rest and during laboratory testing. *Hypertension.* 13 : 647-655.
  - 18) Rowell, L. B. (1993) Human Cardiovascular control. Oxford University Press, New York.

- 19) Rowell, L. B., and D. S. O'Leary (1990) Reflex control of the circulation during exercise : chemoreflexes and mechanoreflexes. *J. Appl. Physiol.* 69 : 401-418.
- 20) Sargeant, A. J. (1994) Human power output and muscle fatigue. *Int. J. Sports Med.* 15 : 116-121.
- 21) Seabury, J. J., W. C. Adams, and M. R. Ramey (1977) Influence of pedaling rate and power output on energy expenditure during bicycle ergometry. *Ergonomics* 20 : 491-498.
- 22) Stok, W. J., F. Baisch, A. Hillebrecht, H. Schulz, M. Meyer, and J. M. Karemaker (1993) Noninvasive cardiac output measurement by arterial pulse analysis compared with inert gas rebreathing. *J. Appl. Physiol.* 74 : 2687-2693.
- 23) Takano, N. (1993) Ventilatory responses during arm and leg exercise at varying speeds and forces in untrained female humans. *J. Physiol. Lond.* 468 : 413-424.
- 24) Wasserman, K., B. J. Whipp, S. N. Koyal, and W. L. Beaver (1973) Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Appl. Physiol.* 35 : 236-243.
- 25) Wendt, I. R., and C. L. Gibbs (1973) Energy production of rat extensor digitorum longus muscle. *Am. J. Physiol.* 224 : 1081-1086.
- 26) Wesseling, K. H., B. de Wit, J. A. P. Weber, and N. T. Smith (1983) A simple device for the continuous measurement of cardiac output. Its model basis and experimental verification. *Adv. Cardiovasc. Phys.* 5, Suppl. II : 16-52.
- 27) Whipp, B. J., S. A. Ward, N. Lamarra, J. A. Davis, and K. Wasserman (1982) Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. *J. Appl. Physiol.* 52 : 1506-1513.
- 28) Willis, W. T., and M. R. Jackman (1994) Mitochondrial function during heavy exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26 : 1647-1354.



## Influence of pedal frequency on cardiorespiratory kinetics of moderate exercise

Tomoyuki SHIOJIRI

Laboratory of Exercise and Sports Science, Yokohama City University

The purpose of this study was to determine the effects of differing pedal frequencies on gas exchange kinetics and hemodynamics at the onset of moderate exercise. Four healthy male subjects performed transitions from rest to a work rate calculated to require a oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) equal to 50% of the estimated lactate threshold, at pedal frequencies of 40, 60, and 80 rpm (random order). Pulmonary ventilation ( $\dot{V}_E$ ),  $\dot{V}O_2$ , carbon dioxide output ( $\dot{V}CO_2$ ), cardiac output ( $\dot{Q}_c$ ), stroke volume (SV), heart rate (HR), and mean arterial pressure (MAP) were determined. Total peripheral conductance (TPC) and arteriovenous  $O_2$  content difference ( $av\Delta O_2$ ) were also calculated as  $\dot{Q}_c$  divided by MAP and  $\dot{V}O_2$  divided by  $\dot{Q}_c$ , respectively.  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}_E$ , and HR at the end of exercise significantly increased with increase of pedal frequency (40, 60, 80 rpm) at this workload, whereas  $\dot{Q}_c$ , SV, and TPC showed no or very small changes with increase of pedal frequency. There were no significant differences in the kinetic parameters of  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{Q}_c$ , and TPC when 40, 60, and 80 rpm were compared. These results suggest that cycling at the same power output at relatively higher frequency results in greater recruitment of type II fibers. This does not affect the kinetics of  $\dot{V}O_2$  because the supply of and demand for oxygen to the active muscle were balanced in case of moderate exercise.

(J. Yokohama City Univ., Seri. of Sports Sci. & Med., 27 : 1-9, 1999)